

半導体歪ゲージを用いたハイダイナミックレンジ1軸力覚センサの開発

19MM227 田村 龍也*

Ryuya Tamura*

1. まえがき

ロボットの活躍領域は近年急速に拡大しており、それとともに普及率も指数関数的に上昇している。この背景は、従来は自動車や家電など製造を行う産業用途での活躍が主であったが、現在は医療、介護やサービス業などの第三次産業に有効性が見込まれ、協働ロボット等が多く開発されていることからわかる。

協働ロボットの中でも特に人間を支援または人間の代替として活動するロボットが注目されている。これらのロボットには環境適応力が求められ、環境情報の取得が必要不可欠となっている。中でも力覚情報は多様な動作の実現のためには必須だと考えられ、実際 DENSO の多関節ロボット⁽¹⁾の安定した作業や ASIMO⁽²⁾のお茶を注ぐ動作、ROBEAR⁽³⁾の人を持ち上げるといった動作も力覚センサを用い、力覚情報を取得することで実現している。

これまでの力覚センサは、発生する力の大きさに合わせて、測定に際し適切なレンジの力覚センサを選出し使用されてきた。しかし多種多様な動作を一台のロボットで実現させる場合、それに導入する力覚センサはレンジが限定的なものではなく、よりハイダイナミックレンジ (HDR: High Dynamic Range) であることが求められる。また、HDR だけでなく、ロボットに取り付け可能なサイズであることが求められる。

このような需要に対し、Jiang らは低剛性起歪体と高剛性起歪体を組み合わせた1軸⁽⁷⁾、2軸⁽⁸⁾の力情報を検知可能な HDR 力覚センサを提案した。また起歪体を用いず、水晶振動子による圧電効果を利用し HDR で力覚検知を可能にした1軸のセンサも提案されている⁽⁹⁾。

さらに1軸、2軸での検知のみであった HDR 力覚センサに対し、Okumura らは6軸の力情報を取得可能な HDR 力覚センサ (size: 150 × 150 × 45 mm) を提案した⁽¹⁰⁾。これはそれぞれが6軸の力情報を取得できる低剛性起歪体と高剛性起歪体を二段に重ね合わせた構造をしており、0.01N から 1000N までの力覚検知が可能である。従来の10倍以上のダ

イナミックレンジを有した力覚センサとなった。

しかし、提案されてきた HDR 力覚センサはセンサ自体のサイズが大きく、先述したようなロボットに導入する上で大きな問題となる。

これに対し我々は起歪体の構造自体を工夫することで HDR と小型化の両立を図るセンサの提案をした。このセンサは低剛性起歪体の形状がクロスアーチ型となっており、高剛性起歪体の隙間にフィットする構造となっている。センササイズは○と小型化に成功し、測定レンジは○を確保出来た。しかし、低荷重域での測定が不向きであることや、従来センサの HDR の広さを保つことが出来なかった。

このことから、小型かつ HDR を有した力覚センサの実現には、被測定材料にあたるセンサ構造自体を工夫するのではなく、センシング部分の改革が必要であると考えた。

そこで本論文では、HDR を実現する新たな手法として、半導体歪ゲージと金属箔歪ゲージを併用した小型で単純な構造の力覚センサを提案する。従来は剛性の異なる起歪体を多段に使用することで実現していた HDR を、本センサでは単純な起歪体構造 (片持ち梁) 上に感度の異なるひずみゲージを導入すること (のみ) で HDR を実現した。

2. 力覚センサの原理

力覚センサは力覚情報を測定するセンサである。力覚情報を測定するためには、被測定材料のひずみ、変化量、または素子の特性変化等を電気信号に変換する必要がある。実際、力覚センサには様々な測定方式が採用されており、ひずみゲージ式⁽⁴⁾ 静電容量式⁽⁵⁾、光学式⁽⁶⁾などが実用化されている。本研究で提案する力覚センサはこの中でもひずみゲージ式の力覚センサである。

〈2・1〉 ひずみゲージ 材料に引張力 (または圧縮力) P が加わる時、これに対応する応力 σ が材料内部に発生する。ここでこの応力に比例した引張りひずみ (または圧縮ひずみ) が発生し、長さ L の材料は $L + \Delta L$ (または $L - \Delta L$) に変形する。この時の L と ΔL の割合をひずみと呼ぶ。

ひずみゲージはこのひずみを電気信号として検出するこ

とのできるセンシング素子のことである。

本研究で使用するひずみゲージは金属箔ひずみゲージと半導体ひずみゲージの二種類である。ひずみゲージは被測定対象に貼り付けて使用される。測定対象に力が加わりひずみが発生すると張り付けたひずみゲージにひずみが伝達される。この時ひずみゲージはひずみの大きさに比例して内部の抵抗体の抵抗値が変化する。これを検出し印加荷重と結び付けることで力覚情報の取得が行える。

式 1

式 1 は発生したひずみとひずみゲージの抵抗変化の関係式である。各変数は：ひずみ, R ：抵抗, ΔR ：抵抗変化, K ：ゲージ率である。ここで K はゲージ率と呼ばれるもので、各ひずみゲージ固有の比例定数である。またゲージ率の大きさは感度の高さを表す指標となる。

表 1 に本研究で使用したひずみゲージの詳細を示す。使用するひずみゲージのゲージ率はそれぞれ異なる値となっている。このゲージの感度の違いを利用し、半導体ひずみゲージでは低荷重域を、金属箔ひずみゲージでは高荷重域のひずみの検出を行い、組み合わせることで HDR を実現する。

〈2・2〉 起歪体

3. HDR1 軸力覚センサの設計

〈3・1〉 起歪体の構造 提案する力覚センサの構造を Fig. 1 に示す。

提案する力覚センサはセンサは片持ち梁の構造を採用している。本力覚センサの設計仕様は有限要素法シミュレーションにより、任意の荷重を印加、この時のひずみ、安全率といったパラメータを参考に決定した。

起歪体の寸法、定格荷重、安全率をそれぞれ表○に示す。また Fig. 2 に $-F_z$ 方向に力を加えた時の各起歪体の挙動を示す。

Table 1 定格荷重 (F [N], M [Nm])

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Low-rigidity	50	50	50	0.6	0.6	0.6
High-rigidity	500	500	500	10	10	12

設計した各起歪体の寸法を Table ?? に示す。

4. 性能試験

製作した力覚センサに対する性能試験の結果について述

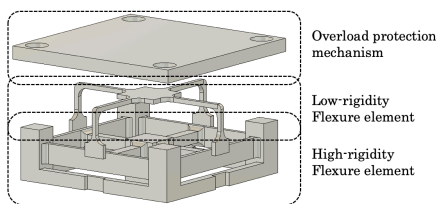


Fig. 1 全体の構造

Table 2 安全率

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
Low-rigidity	2.04	2.04	1.83	1.78	1.78	3.13
High-rigidity	1.37	1.37	1.39	1.23	1.23	1.78

べる。

製作した力覚センサを Fig. 4 に示す。

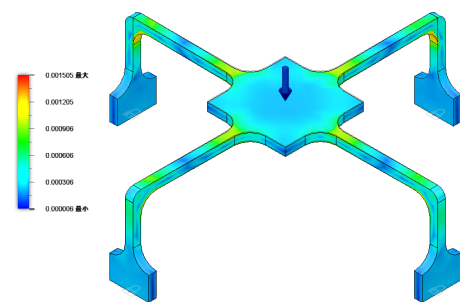
〈4・1〉 非線形性・他軸干渉試験 力覚センサは荷重-ひずみ変換行列を用いて印加荷重を算出する。印加された荷重に対する出力値の非線形性や、印加された荷重以外の成分の出力が応答する他軸干渉は力覚センサの性能に関わる重要な指標である。

算出した荷重-ひずみ変換行列により変換した低剛性起歪体の荷重出力を Fig. ?? に示す。6 軸ともに線形的な出力結果が得られた。しかし、 F_x, F_z, M_z の結果を見ると、他軸干渉成分が較正しきれていないことが確認できる。

低剛性起歪体は M_y 以外の軸では算出結果からも線形性が示された。高剛性起歪体は低剛性起歪体と比較すると非線形的であるが、Fig. ?? で確認できた結果同様に F_z, M_y 以外の軸は線形性が示された。また他軸干渉においては低剛性起歪体の結果が大きい数値を示している。これは主軸自体の出力値が小さい分、他軸成分が大きく干渉してしまっていると考えられる。

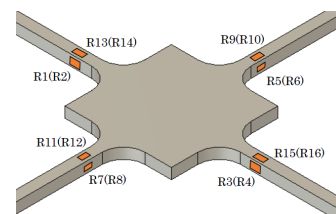
〈4・2〉 SN 比と測定レンジ Fig. ?? に各ひずみゲージから得られた出力の SN 比の推移を示す。この結果は高周波ノイズ (0.3% R.O.), 非線形性, 他軸干渉を考慮したものとなっている。

この結果より、1 つの起歪体上に種類の異なるひずみゲージを張り付けることで 1 つのセンサとして力の測定が可能なのが分かる。よって本力覚センサは 0.2N から 500N の



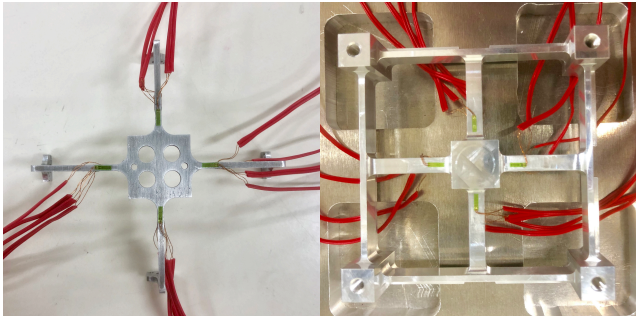
(a) 低剛性起歪体

Fig. 2 有限要素法シミュレーションによる結果



(a) 低剛性起歪体

Fig. 3 ひずみゲージの貼付位置



(a) 低剛性起歪体 (b) 高剛性起歪体

Fig.4 製作した小型 HDR6 軸力覚センサ

測定レンジを有していることが示された。

5. まとめ

小型かつ HDR を有した力覚センサの開発を目的とし、片持ち梁の起歪体に金属箔歪ゲージと半導体歪ゲージを貼り付ける構造のセンサを提案した。

製作した HDR1 軸力覚センサの構造は非常に単純な設計で構成することが可能であり、半導体歪ゲージで $\circ\circ\text{N}$ の範囲で分解能 \circ の測定精度を、金属箔歪ゲージで $\circ\circ\text{N}$ の範囲で分解能 \circ の測定精度を示し、SN 比より、 $\circ\text{N}$ から $\circ\text{N}$ までの力覚検知が可能であることが示された。よって感度の異なる歪ゲージを併用することで、起歪体の構造自体は単純でもダイナミックレンジを有した力覚センサの実現が可能であることが示された。

今後は 1 軸のみで実現した本センサを 6 軸測定が可能なセンサへと拡張を行う。これにより小型かつ単純な構造の HDR6 軸力覚センサの開発を目指す。

謝 辞

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものであることをここに付記し、関係者各位に謝意を表する。さらに、本研究を進めるにあたり、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました辻俊明准教授、境野翔助教をはじめ大河原寛研究員に深謝いたします。また、様々なご指摘をくださいました辻研究室の先輩方および同期の皆様に感謝いたします。

文 献

- (1) 力センサ有コンプライアンス機能. <https://www.denso-wave.com/ja/robot/product/function/Acontact.html> [Online; accessed 2019-02-14]
- (2) Honda—ASIMO. <https://www.honda.co.jp/ASIMO/>. [Online; accessed 2019-02-14]
- (3) 介護支援ロボット研究用プラットフォーム ROBEAR. <http://rtc.nagoya.riken.jp/ROBEAR/>. [Online; accessed 2019-02-14]
- (4) Tsuneo Yoshikawa and Taizou Miyazaki. A six-axis force sensor with three-dimensional cross-shape structure. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 249–255. IEEE, 1989.
- (5) Felix Beyeler, Simon Muntwyler, and Bradley J. Nelson. A six-axis MEMS force-torque sensor with micro-Newton and nano-Newtonmeter resolution.

- J. Microelectromechanical Syst.*, Vol. 18, No. 2, pp. 433–441, 2009.
- (6) Ji Chul Kim, Kyung Soo Kim, and Soohyun Kim. Note: A compact three-axis optical force/torque sensor using photo-interrupters. *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 84, No. 12, pp. 77–80, 2013.
- (7) Jun Jiang, Weihai Chen, Jingmeng Liu, Wenjie Chen, and Jianbin Zhang. Design of a Dual-Range Force Sensor for Achieving High Sensitivity, Broad Bandwidth, and Large Measurement Range. *IEEE Sens. J.*, Vol. 15, No. 2, pp. 1114–1123, 2015.
- (8) Jun Jiang, Weihai Chen, Jingmeng Liu, and Wenjie Chen. A cost effective multi-axis force sensor for large scale measurement : design , modeling , and simulation. pp. 188–193, 2013.
- (9) Yuichi Murozaki, Kousuke Nogawa, and Fumihito Arai. Miniaturized load sensor using quartz crystal resonator constructed through microfabrication and bonding. *Robomech J.*, Vol. 1, No. 1, p. 3, 2014.
- (10) Daisuke Okumura, Sho Sakaino, and Toshiaki Tsuji. High Dynamic Range Sensing by a Multistage Six-Axis Force Sensor with Stopper Mechanism. In *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 1–6. IEEE, 2018.
- (11) 辻俊明, 奥村大輔, 境野翔. 多段階ハイダイナミックレンジ 6 軸力覚センサの小型化. 日本ロボット学会学術講演会, 2018.
- (12) 緒方浩二郎, 柏木邦雄, 小野耕三. 力覚センサ, 1991.
- (13) Ryosuke Hanyu, Toshiaki Tsuji, and Shigeru Abe. A simplified whole-body haptic sensing system with multiple supporting points. In *Proc. IEEE Int. Work. Adv. Motion Control*, pp. 691–696. IEEE, 2010.
- (14) 向井優, 野田善之. 六軸力覚センサの原理と構造. 精密工学会誌, Vol. 84, No. 4, pp. 303–306, 2018.